

М. Тарасенко, канд. техн. наук; В. Коваль

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДІГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОДІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП

*Розглянуто перехідні процеси попереднього підігрівання електродів з точки зору їх впливу на експлуатаційні характеристики люмінесцентних ламп. Отримано осцилограми напруги і струму перехідних процесів попереднього підігрівання електродів. Визначено оптимальну тривалість перехідних процесів попереднього підігрівання електродів у залежності від величини струму та сформульовано аналітичну залежність між цими величинами для люмінесцентних ламп потужністю від 6 до 36 Вт. Проведено дослідження роботи електродів люмінесцентних ламп у режимі тривалого попереднього підігрівання при наявності і відсутності приелектродного розряду. Встановлено вплив приелектродного розряду на розпилення оксидного шару з електродів.*

M. Tarasenko, V. Koval

## INFLUENCE OF PARAMETERS OF ELECTRODES PREHEAT ON OPERATING DESCRIPTIONS OF FLUORESCENT LAMPS

*The transitional processes of electrodes preheating are considered from the point of view their influence on operating descriptions of fluorescent lamps. Diagrams of tension and current of transitional processes of the electrodes preheating are got. Optimum duration of transitional process of the electrodes preheating is definite depending of current value and analytical dependence is formulated between these values for fluorescent lamps by power from 6 to 36 Wt. Research of work of electrodes of fluorescent lamps is worked in the mode of the prolonged electrodes preheating at presence and absence of near-electrode discharge. Influence of near-electrode discharge is set on dispersion of oxide layer from electrodes.*

### Умовні позначення

$I_{nn}$ ,  $i_{nn}$  – діюче та миттєве значення струму попереднього підігрівання електродів ЛЛ відповідно, А;  
 $k_t$  – кратність струму попереднього підігрівання електродів ЛЛ;  
 $I_{д.н}$  – діюче значення номінального струму ЛЛ, А;  
 $u_m$  – миттєве значення напруги мережі живлення, В;  
 $I_{др}$  – діюче значення струму через дросель, А;  
 $U_{др}$  – діюче значення напруги на дроселі, В;  
 $t_{nn}$  – тривалість перехідного процесу попереднього підігрівання електродів ЛЛ при кратності струму попереднього підігрівання відмінного від одиниці, с;  
 $r_e = u_{ел} / i_{nn}$  – миттєве значення опору електроду ЛЛ, Ом;  
 $t_{nn.H}$  – тривалість перехідного процесу попереднього підігрівання електродів ЛЛ номінальним струмом  $I_H$  попереднього підігрівання, с;  
 $k_t$  – кратність тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання електродів ЛЛ;  
 $u_{ел}$  – миттєве значення напруги на електроді під час попереднього підігрівання, В.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** В Україні у сфері послуг найпопулярнішими серед існуючих джерел світла (96 % від загальної кількості) є люмінесцентні лампи (ЛЛ) [1]. Це пояснюється не тільки їх енергоощадністю, світлова віддача ЛЛ у 4-5 раз більша, ніж у ламп розжарювання, але і суттєво більшою середньою тривалістю горіння (СТГ). Остання в значній мірі визначається перехідними процесами, які мають місце перед виникненням дугового розряду в ЛЛ. Незважаючи на це, чітких вимог до параметрів перехідних процесів запалювання ЛЛ поки що не існує. Їх потрібно сформулювати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** [2, 3, 4] показав, що ефективність та надійність запалювання ЛЛ безпосередньо залежить від тривалості попереднього підігрівання електродів. При недостатньому попередньому підігріванні електродів

відбуваються холодні запалювання ЛЛ, що приводить до суттєвого скорочення СТГ. Згідно з [3], якщо за 100 % прийняти СТГ ЛЛ з достатньо підігрітими електродами, то при винятково холодних запалюваннях у трьохгодинному режимі експлуатації остання зменшується до 30 %. Це вказує на те, що при проектуванні пускорегулювальної апаратури потрібно з самого початку забезпечити оптимальні, з точки зору мінімізації розпилення оксиду, параметри режиму попереднього підігрівання електродів.

Саме тому **метою даної роботи стало** визначення оптимальних параметрів режимів попереднього підігрівання електродів ЛЛ.

Для цього проведено ряд експериментів з ЛЛ з потужністю 6, 8, 13 Вт – діаметр колби 16 мм (Т5) та 15, 18, 36 Вт – діаметр колби 26 мм (Т8). ЛЛ потужністю 36 Вт включались в коло з напругою живлення 220 В, а інші – в коло з напругою 127 В промислової частоти. Дослідження впливу параметрів перехідних процесів на СТГ і надійність запалювання ЛЛ проведено в колі, зображеному на рис. 1, а.

Після замикання ключа  $K_1$  ( $K_2$  розімкнутий,  $K_3$  замкнутий) в електричному колі з індуктивно-ємнісним баластом рис. 1,а, через дросель Др, конденсатор  $C_1$ , перший електрод, ключ  $K_3$  і другий електрод починає протікати струм – струм попереднього підігрівання електродів ЛЛ. Кратність струму попереднього підігрівання ( $k_I = I_{mn}/I_H$ ) в дослідах змінювався за допомогою зміни ємності конденсатора  $C_1$  в межах від 1 до 2 з кроком 0,25.

Через певний проміжок часу спочатку замикався ключ  $K_2$ , а потім розмикався ключ  $K_3$ . Замикання ключа  $K_2$  дає можливість узгодити струм попереднього підігрівання, з заданою кратністю, з робочим (номінальним) струмом лампи. При розмиканні ключа  $K_3$  виникає імпульс напруги, який запалює ЛЛ.

Враховуючи той факт, що при комутаціях (замиканні ключа  $K_2$ ) зсув фаз між напругою і струмом в колі змінювався, ключ  $K_3$ , для забезпечення найбільшої ймовірності запалювання лампи, розмикався тільки після закінчення перехідного процесу, пов'язаного із зсувом фаз, в момент проходження напруги через амплітудне значення.

Відповідно до вищезазначеного, в момент переходу напруги на електродах ЛЛ через «0», конденсатор шунтувався ключем  $K_2$ . Впродовж півперіоду мінявся зсув фаз між напругою живлення та струмом. Після цього в перший півперіод напруги на електродах, при амплітудному її значенні, розмикався ключ  $K_3$  і до міжелектродного проміжку прикладався запалюючий імпульс. Лампа запалювалась і працювала у схемі з індуктивним баластом.

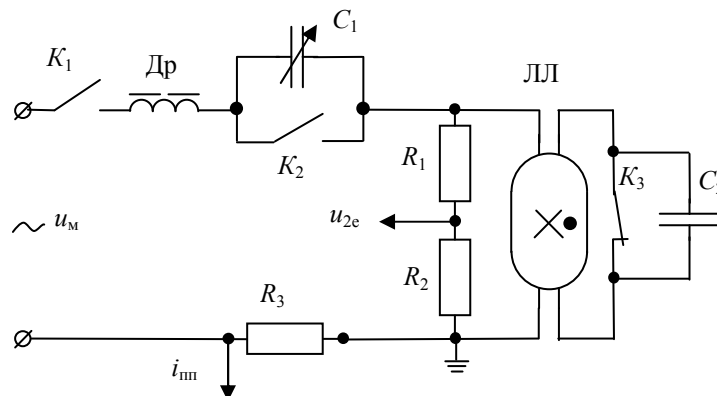


Рисунок 1 - Схема дослідження перехідних процесів попереднього підігрівання електродів ЛЛ

Керування електронними ключами  $K_1$ ,  $K_2$  і  $K_3$  проводилось на віртуальному вимірювальному комплексі (ВБК) на базі персонального комп'ютера [2]. Осцилограми струму через ЛЛ та напруги на ній подавались до ВБК з давача струму (резистор  $R_3$ ) та напруги (резистивний подільник  $R_1R_2$ ). В якості давачів було використано високоточні резистори марки С5-5-10 Вт з допустимим відхиленням величини опору від номіналу до 0,5 %.

Для вмикання ЛЛ типу Т8 потужністю 36 Вт використано дросель серії В40. Для інших типів ламп, які працювали при напрузі живлення 127 В, розроблено і сконструйовано універсальний дросель (рис. 2,а). В ньому можна змінювати індуктивність за рахунок регулювання немагнітного зазору регулятором і кількості витків у обмотках перемикачами з кроком 16 витків. Дросель виконаний на витому магнітопроводі з двома обмотками, з'єднаними послідовно-узгоджено. Сумарна кількість витків 2032. Вольт-амперні характеристики дроселя мають лінійний характер в межах робочих напруг і струмів досліджуваних ЛЛ (рис. 2, б).

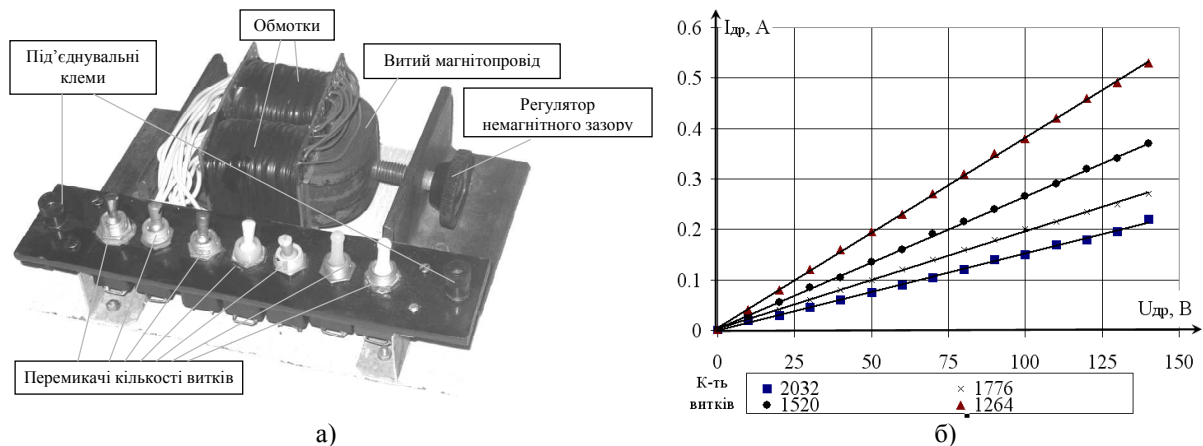
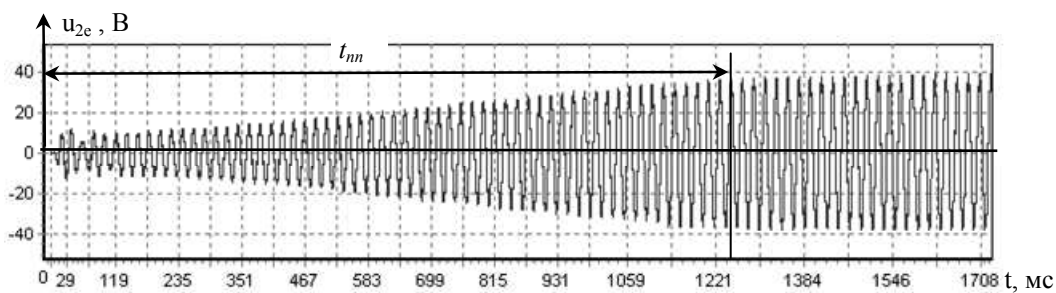
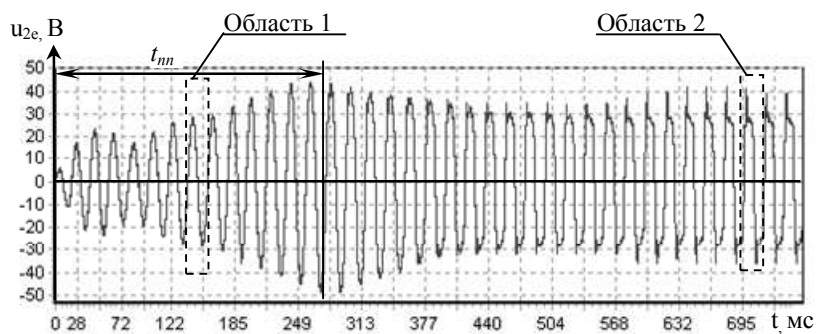


Рисунок 2 - Універсальний дросель

а) конструкція; б) вольт-амперні характеристики з немагнітним зазором 1 мм

З отриманих осцилограм напруги на лампі (рис. 3,а,б), яка в режимі попереднього підігрівання дорівнює падінню напруги на двох послідовно з'єднаних електродах, визначено тривалість перехідного процесу попереднього підігрівання, який починається в момент подання напруги на ЛЛ (замикання ключа  $K_1$ ) і закінчується (для кратності струму попереднього підігрівання, меншій 1,5) в момент досягнення на електродах усталеного значення. Для кратності струму, більшій 1,5, – в момент виникнення приелектродного розряду [2]. З табл. 1 видно, що при зростанні кратності струму попереднього підігрівання ( $k_f$ ) тривалість перехідного процесу ( $t_{nm}$ ) зменшується. При кратності струму попереднього підігрівання меншій 1,5 напруга на електродах має форму синусоїди із зростаючою амплітудою (рис. 3, а). При кратності струму більшій 1,5 напруга на електродах ЛЛ під час розігрівання електродів до температури термоелектронної емісії має синусоїдний характер (рис. 3, б, в). Її амплітудне значення поступово зростає у міру збільшення температури електродів до 1050°C, яку виміряно пірометром ОПЛИР-09 у ЛЛ із прозорою колбою без люмінофору, після якої починає спадати і змінює форму (рис. 3, б, г). Форма напруги нагадує напругу на ЛЛ при її горінні. Тобто має місце імпульс перезапалювання після якого відбувається різке пониження напруги до напруги горіння і наступне погасання розряду. В області електрода спостерігається приелектродний розряд у вигляді білого свічення, яке при зростання струму попереднього підігрівання стає все більш яскравішим.

Характер зміни миттєвих значень опору електродів ( $r_e$ ) з часом визначався за законом Ома. Після досягнення напруги на електроді певного значення, наприклад в ЛЛ потужністю 8 Вт  $U_e = 12,5$  В, на осцилограмі (рис. 4, а) спостерігається коливальний характер миттєвих значень опору електрода. При цьому частота коливань у два рази більша за частоту напруги мережі живлення, а опір електрода набуває мінімального значення ( $r_{e.min}$ ) в момент, коли початкова фаза напруги живлення рівна 90° та 270° (рис. 4,б та рис. 3.г). Це означає, що дійсно при існуванні приелектродного розряду зменшується опір системи електрод-приелектродний розряд, який, в основному, залежить від інтенсивності приелектродного розряду, так як гарячий опір самого електрода не може зменшитись так швидко і в таких межах (з 80 до 40 Ом).


 а) при  $I_{nn} = 0,181 \text{ А}$  ( $k_I = 1,25$ )

 б) при  $I_{nn} = 0,254 \text{ А}$  ( $k_I = 1,75$ )

 в) при  $I_{nn} = 0,254 \text{ А}$  ( $k_I = 1,75$ )

 г) при  $I_{nn} = 0,254 \text{ А}$  ( $k_I = 1,75$ )

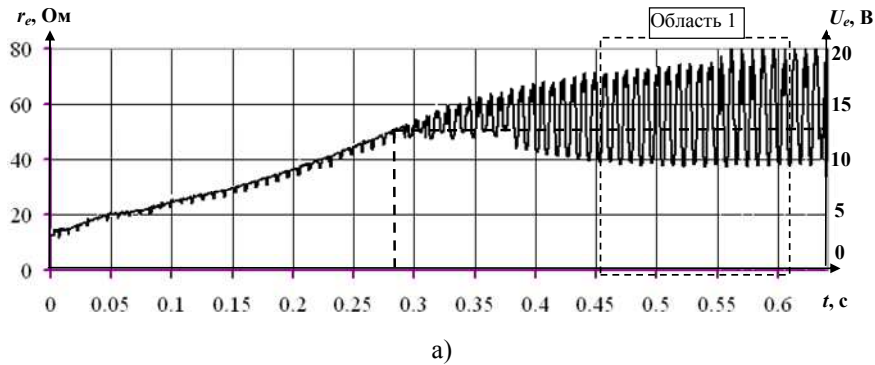
Рисунок 3 - Осцилограми напруги на електродах ЛЛ Т5 потужністю 8 Вт

Таблиця 1 - Залежність тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання електродів ЛЛ від струму для досліджуваних типів ламп

	Т5, 6 Вт					Т5, 8 Вт				
$I_{nn}, \text{ А}$	0,160	0,200	0,240	0,280	0,320	0,145	0,181	0,218	0,254	0,290
$k_I$	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
$t_{nn}, \text{ с}$	<b>2,65</b>	1,35	0,76	0,55	0,30	<b>2,10</b>	1,25	0,62	0,28	0,27
	Т5, 13 Вт					Т8, 15 Вт				
$I_{nn}, \text{ А}$	0,165	0,206	0,247	0,288	0,330	0,330	0,412	0,495	0,577	0,660
$k_I$	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
$t_{nn}, \text{ с}$	<b>3,31</b>	1,91	0,95	0,62	0,38	<b>2,45</b>	1,42	0,77	0,34	0,24
	Т8, 18 Вт					Т8, 36 Вт				
$I_{nn}, \text{ А}$	0,370	0,463	0,555	0,648	0,740	0,430	0,538	0,645	0,753	0,860
$k_I$	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,25</b>	<b>1,50</b>	<b>1,75</b>	<b>2,00</b>
$t_{nn}, \text{ с}$	<b>2,64</b>	1,65	0,95	0,56	0,26	<b>4,36</b>	2,30	1,25	0,63	0,40

У зв'язку з тим, що тривалість перехідних процесів попереднього підігрівання електродів ЛЛ різної потужності при однаковій кратності струму різна (табл. 1), для визначення абсолютних значень тривалості попереднього підігрівання введемо поняття кратності тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання електродів ЛЛ:

$$k_t = t_{nn} / t_{nn.H} . \quad (1)$$



Область 1 збільшена

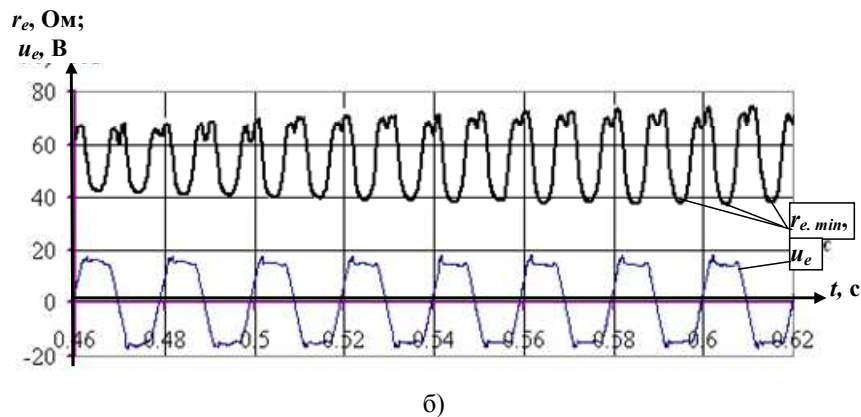


Рисунок 4 - Осцилограми опору і напруги на електроді ЛЛ Т5 потужністю 8 Вт при  $I_{nn} = 0,254 \text{ A}$  ( $k_I = 1,75$ )

За результатами обчислення значення  $k_t$  для ЛЛ потужністю від 6 до 36 Вт побудовано графік (рис. 5). З графіка (рис. 5) видно, що кратність тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання електродів для заданого  $k_I$  не залежить від потужності лампи і спостерігається велика кучність значень  $k_t$  для ламп різної потужності при однаковій кратності струму, що дає можливість встановити аналітичну залежність середніх значень  $k_t$  від  $k_I$ . Ця залежність виявилась експоненціальною:

$$k_t = 9,48 \cdot e^{-2,26 \cdot k_I} . \quad (2)$$

Для зручності визначення тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання підставимо вираз (1) у (2):

$$t_{nn} = 9,48 \cdot e^{-2,26 \cdot k_I} \cdot t_{nn.H} . \quad (3)$$

Вихідні дані для обчислення  $t_{nn}$  наведено в табл. 1 (жирно).

Отримана функціональна залежність  $k_t = f(k_I)$  дає можливість обчислити необхідну оптимальну тривалість перехідного процесу попереднього підігрівання для забезпечення надійного запалювання ЛЛ при кратності струму від  $k_I = 1$  до  $k_I = 2$ .

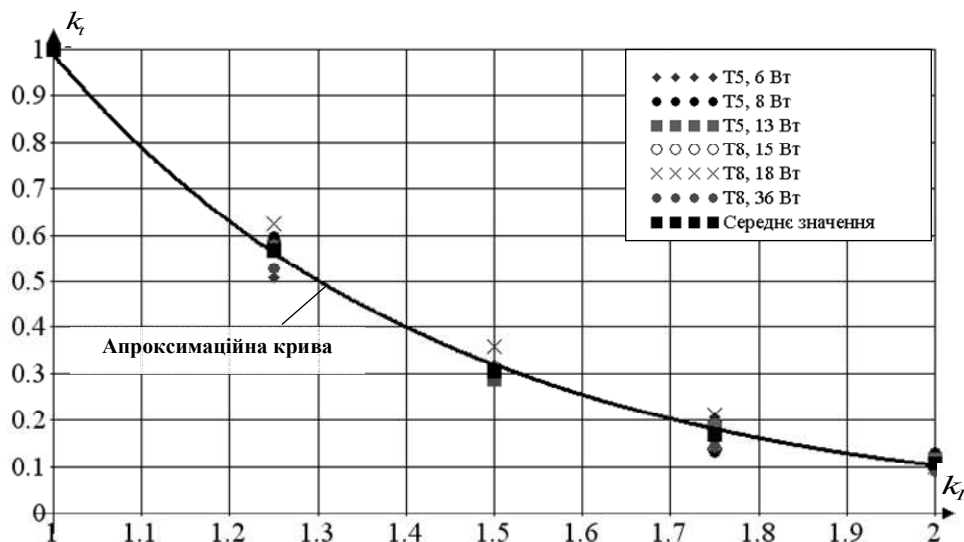


Рисунок 5 - Експериментальні залежності  $k_t = f(k_l)$  для ЛЛ різної потужності та апроксимаційна крива середніх значень  $k_t$  з похибкою 3,5 %

Для визначення впливу приелектродного розряду на випаровування оксидного шару проведено дослідження роботи електродів ЛЛ в режимі попереднього підігрівання на змінному та постійному струмі (рис.6) при наявності і відсутності приелектродного розряду. Для цього взято ЛЛ типу Т8 потужністю 18 Вт. Холодний опір її електродів однаковий і рівний 2,8 Ом. Кожен з електродів працював незалежно і неодноразово в режимі попереднього підігрівання. При цьому через кожен електрод протікав струм різної величини. Один електрод підігрівався струмом 0,53 А у схемі рис. 6, а. При такій величині струму приелектродний розряд ще не виникав і візуально спостерігалось червоне свічення. Другий електрод підігрівався струмом 0,57 А у такій же схемі. При такій величині струму вже виникав приелектродний розряд і візуально спостерігалось біле свічення приелектродної області. Такі близькі величини струмів (різниця близько 7 %) використано для того, щоб на випаровування оксидного шару з електрода практично не впливала величина струму попереднього підігрівання і воно залежало лише від наявності приелектродного розряду. Таку методику досліджень з однією лампою вибрано з тієї точки зору, що електроди в одній і тій же ЛЛ гарантовано з однієї партії і знаходяться в однаковому оточуючому середовищі. Аналогічним чином досліджено ще п'ять ЛЛ цього ж типу і потужності для забезпечення достовірності дослідних даних з ймовірністю 0,95.

Ступінь розпилення електродів визначався візуально за наявністю і насиченістю потемніння на колбі в приелектродній ділянці. Фотографії приелектродних ділянок нової лампи і після 12 годин роботи в режимі попереднього підігрівання наведено в табл. 2. Як на змінному, так і на постійному струмі ефект наявності приелектродного розряду однаково вплинув на потемніння колби. Порівнявши фотографії в стовпцях табл. 2, можна зробити висновок, що при наявності приелектродного розряду відбувається значно інтенсивніше випаровування оксидного шару, що приводить до скорочення СТГ ЛЛ. Про це свідчить темніша приелектродна ділянка. Саме тому кратність струмів і тривалість попереднього підігрівання не повинні перевищувати значення, при яких виникає приелектродний розряд.

### Висновки

1. Час попереднього підігрівання із зростанням кратності струму від 1 до 2 зменшується майже в 10 раз, що добре з точки зору реалізації надійності запалювання ЛЛ при великій кратності струму (більше 1,5);
2. Залежність кратності тривалості перехідного процесу попереднього підігрівання електродів від кратності струму попереднього підігрівання описується експоненціальною залежністю (2) з похибкою 3,5 %;

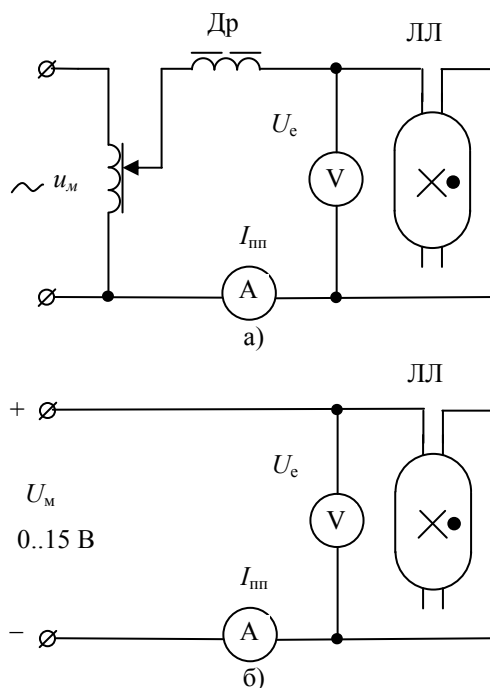


Рисунок 6 - Схема дослідження розпилення оксидного шару з електродів  
а) на змінному струмі; б) на постійному струмі

Таблиця 2 – Фотографії приелектродних ділянок колби ЛЛ Т8 потужністю 18 Вт після 12 годин роботи в режимі попереднього підігрівання

Тривалість роботи, год	Струм через електрод 0,57 А (присутній приелектродний розряд)	Струм через електрод 0,53 А (приелектродний розряд відсутній)
0		
12		

- При кратності струму попереднього підігрівання 1,5 і більше зміна опору електродів з часом має коливальний характер, що обумовлено виникненням приелектродного розряду. При цьому відбувається більш інтенсивніше випаровування оксидного шару з електродів (табл. 2), що приводить до скорочення СТГ ЛЛ;
- Хоча приелектродний розряд позитивно впливає на запалювання ЛЛ, проте, з точки зору зменшення випаровування оксидного шару з електродів, його тривалість необхідно обмежувати, а краще взагалі не допускати його виникнення;
- При кратності струму попереднього підігрівання більшій 1,5 електроди ЛЛ слід підігрівати чітко встановлений час (табл. 1) (3), обмеживши його часом нагрівання електродів до температури термоелектронної емісії, з одного боку, і виникненням приелектродного розряду з другого боку.

**Перспективою подальшої роботи** в даному напрямку є: 1) проведення детальних досліджень попереднього підігрівання електродів ЛЛ при наявності приелектродного розряду на змінному та постійному струмі; 2) встановлення залежності електричних характеристик системи електрод-приелектродний розряд від діаметра колби ЛЛ; 3) створення математичної моделі електричних характеристик електродів ЛЛ з врахуванням отриманих результатів проведених досліджень.

**Література**

1. Кожушко Г.М. Энергосберегающее освещение – состояние и проблемы// Світлолюкс. – 2007. – № 3. – С. 50-55.
2. Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. - М.: Энергия. – 1974. - 368 с.
3. Штурм Г.К. Пускорегулирующая аппаратура и схемы включения люминисцентных ламп. - М.: Изд-во иностр. лит. – 1961. – 207 с.
4. Литвинов В.С., Реттнер В., Засоркин А.Ф. Улучшение условий зажигания и срок службы люминисцентных ламп// Светотехника. – 1969. – № 1. – С. 6-10.
5. Тарасенко М.Г., Коваль В.П. Віртуальний вимірювальний комплекс для дослідження перехідних процесів в електричних колах довільної конфігурації// Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2006. – Т.8, №1. – С. 84–91.

*Одержано 17.06.2008 р.*